

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи

Иванова Диана Владимировна

НЕ-ЛТР ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ
ЛИНИЙ $K I$ И $Ca II$ В ИЗЛУЧЕНИИ
АТМОСФЕР ОДИНОЧНЫХ И ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД

Специальность 01.03.02 - астрофизика и радиоастрономия

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

пос. Нижний Архыз - 2005

Работа выполнена в Казанском государственном университете

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
В.В. ШИМАНСКИЙ

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор **В.Е. ПАНЧУК** (САО РАН)
кандидат физико-математических наук,
Э.А. АНТОХИНА (ГАИШ МГУ)

Ведущая организация: СПбГУ г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится *"25" октября* 2005 г.
в *"11³⁰"* часов на заседании специализированного совета Д 002.203.01
при Специальной астрофизической обсерватории по адресу:
369167, Россия, Карачаево-Черкесская респ., пос. Н. Архыз, САО
РАН

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Специальной
астрофизической обсерватории РАН

Автореферат разослан *"24" сентября* 2005 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
кандидат физ. - мат. наук



Е.К. МАЙОРОВА

2006-4
14971

2178979

Одним из фундаментальных вопросов астрофизики является вопрос о происхождении и эволюции звезд и вещества в Галактике.

Для определения эволюционного статуса конкретной звезды необходимо знать ее основные параметры. Параметрами, определяющими трек звезды на диаграмме Герцшпрунга-Рессела (ГР), являются: светимость L и, следовательно, эффективная температура T_{eff} и радиус R ; масса M или ускорение силы тяжести g ; химический состав по числу атомов $\lg \epsilon = \lg(N_{el}/N_H) + 12$. Среди этих параметров выделяют так называемые фундаментальные: T_{eff} , M и R .

Если фундаментальные параметры звезды известны недостаточно точно, то установить ее положение на диаграмме ГР, а значит эволюционный статус, будет весьма затруднительно. Поэтому проблема корректного определения параметров звезд оказывается одной из важнейших в современной астрофизике.

Метод моделей атмосфер в настоящее время является одним из самых перспективных инструментов для исследования излучения одиночных и двойных звезд и определения их фундаментальных параметров. Его несомненным преимуществом является возможность построения моделей с прямым численным учетом всех физических явлений, влияющих на характеристики излучения. Наиболее эффективным методом моделей атмосфер оказывается при анализе линейчатых спектров, когда большой объем исходных данных при их относительно хорошем качестве позволяет получить наиболее полную информацию о характеристиках звезд, таких как эффективная температура, поверхностная гравитация, металличность, радиус, поля скоростей на их поверхностях, темпы переноса масс, напряженности магнитных полей и др.

Однако именно при исследовании спектров с применением метода моделей атмосфер могут возникать существенные ошибки, если расчеты выполняются в рамках гипотезы локального термодинамического равновесия (ЛТР). Спектральные линии формируются в достаточно высоких слоях атмосферы, где она становится сильно разреженной. Вследствие этого столкновительные процессы не могут обеспечивать равновесное распределение атомов по энергетическим уровням.

ческим состояниям, как это происходит в глубоких слоях.

Между тем, использование методики не-ЛТР расчетов требует большого объема вычислений, и ее применение для массового анализа спектров конкретных звезд затруднительно. Поэтому мы выбрали для анализа атомы, на которых, вероятно, в значительной степени сказываются не-ЛТР эффекты. Выбор, сделанный нами, опирался на не-ЛТР исследования, выполненные для ряда элементов в последние годы.

Наиболее полное изучение отклонений от ЛТР проводилось в это время для атомов щелочных и щелочно-земельных элементов, которые имеют только один или два валентных электрона, и их модели атома отличаются относительной простотой. Исследования для атомов *Li*, *Na*, *Al*, *K*, *Mg*, *Ca*, *Sr*, *Ba* показало, что ионизационное равновесие атом/ион не описывается формулой Саха. Это приводит к изменению эквивалентных ширин спектральных линий, в том числе слабых, что, в свою очередь, влияет на значения физических параметров звездных атмосфер, получаемых по этим линиям. Взаимосвязь между сложной системой уровней определяется многочисленными процессами, роль которых заранее предсказать невозможно. Кроме того, интенсивность линии зависит не только от населенностей уровней, но и от оптической глубины ее формирования. Поскольку в первом приближении оптическая глубина пропорциональна населенности нижнего уровня линии, то при отклонении последней величины от равновесного значения происходит изменение теоретической интенсивности линии. Все это приводит к выводу о том, что о влиянии не-ЛТР эффектов на определяемое содержание элементов можно сказать лишь после соответствующих не-ЛТР расчетов.

Однако современное развитие методологии не-ЛТР моделирования и понимание механизмов формирования равновесных состояний уже позволяет делать прогнозы значимых отклонений от ЛТР для химических элементов, на основе предварительного анализа их атомарных данных. Проиллюстрируем это заключение на конкретном примере.

Сечения ионизации атомов и ионов, находящихся в неосновной

Таблица 1: Сечения фотоионизации и неЛТР поправки в содержаниях для сильных линий разных элементов в спектрах *G*-звезд.

Элемент	<i>AlI</i>	<i>LiI</i>	<i>MgI</i>	<i>CaII</i>	<i>NaI</i>	<i>KI</i>
$\lg \sigma_{\nu_0}, \text{см}^{-2}$	-16.2	-17.8	-17.9	-18.2	-18.9	-19.9
$\Delta \lg \varepsilon, \text{dex}$	(0.7)	(-0.1)- -(0.2)	(-0.2)- -(0.1)	(-0.2)- -(-0.1)	(-0.4)- -(-0.1)	<(-0.3)

стадии ионизации, являются важнейшим фактором, влияющим на ионизационное равновесие. В табл. ?? для отдельных элементов приведены значения порогового сечения $\lg \sigma_{\nu_0}$ для основного состояния и отклонения от ЛТР в содержаниях $\Delta \lg \varepsilon$ по сильным линиям в атмосферах *G*-звезд. Видно, что элементы, имеющие сечения ионизации вне границ, даваемых значениями $\sigma_{\nu_0}(\text{LiI})$ и $\sigma_{\nu_0}(\text{NaI})$, должны иметь существенные отклонения от ЛТР.

Как видно, атомы *KI* и, в меньшей степени, ионы *CaII* должны иметь значимые отклонения от ЛТР в атмосферах звезд поздних типов. Данный вывод в целом усиливается при учете других атомных характеристик, таких как наличие сильных линий в красном и инфракрасном диапазонах спектра и эффективность взаимодействия высоковозбужденных уровней с континуумом. Поэтому в своей работе мы попытались выполнить всесторонние исследования не-ЛТР эффектов в линиях *KI* и *CaII*.

Важной предпосылкой к проведению наших исследований явилась возникшая только в последние годы возможность использовать их результаты для анализа наблюдаемых линий *KI* и *CaII* в спектрах конкретных объектов.

Практически единственной реально пригодной для изучения линий нейтрального калия является одна из компонент $\lambda 7699 \text{ \AA}$ его резонансного дублета. Однако, эта линия лежит в ИК части спектра, и поэтому стала доступной для практического применения совсем

недавно, с появлением современных цифровых методов регистрации излучения на ПЗС-матрицах. В этой ситуации наши оценки не-ЛТР отклонений в линиях KI позволят предупредить возможные ошибки при определении содержаний данного элемента в приближении ЛТР.

Отклонения от ЛТР в ионе $CaII$ интересны для изучения в приложении к облучаемым атмосферам. Линии H и K $CaII$ являются наиболее сильными линиями металлов для широкого диапазона температур $T_{eff} = 4000 - 12000K$ и часто используются в исследованиях хромосфер Солнца и одиночных звезд поздних спектральных классов. Результаты этих исследований показывают, что линии ионизованного кальция являются хорошими индикаторами хромосферной структуры. Одновременно авторы этих исследований указывают на существование очевидных отклонений от ЛТР в ядрах линий $CaII$, приводящих к ослаблению эмиссионных компонент. Поэтому исследование не-ЛТР эффектов в этих линиях позволит оценить их пригодность для анализа температурных распределений в облучаемых атмосферах звезд в ТДС.

В заключение заметим, что ион $CaII$ и атом KI имеют относительно простую структуру термов и набор атомных параметров, установленных с хорошей точностью. Данный факт позволяет надеяться, что результаты расчетов будут характеризоваться высокой точностью и достоверностью.

В связи со всем вышесказанным отметим, что основной целью работы является исследование формирования линий KI и $CaII$ в атмосферах звезд поздних спектральных классов и ТДС, куда включены:

1. Разработка методики вычислений отклонений от ЛТР для населенностей уровней и профилей линий KI и $CaII$. Исследование применимости новейших атомных данных в не-ЛТР расчетах. Анализ максимального количества линий KI и $CaII$ в спектре Солнца и эмпирическое уточнение коэффициентов их Ван-дер-Ваальсовского уширения.

2. Расчеты не-ЛТР поправок в линиях KI для сеток моделей атмосфер с параметрами: $T_{eff} = 4000 - 10000K$, $\lg g = 0.0 - 4.5$,

$[M/H] = (0.0) - (-2.0)$. Анализ формирования линий KI в спектрах $(A-K)$ -звезд при отказе от гипотезы ЛТР и механизмов перераспределения атомов, определяющих характер и амплитуду не-ЛТР отклонений.

3. Определение не-ЛТР содержаний калия в атмосферах выбранных звезд диска Галактики. Анализ влияния не-ЛТР поправок на вычисляемые содержания калия в конкретных звездах и общее поведение зависимости $[K/Fe]-[Fe/H]$ с целью изучения химической эволюции Галактики.

4. Исследование влияния внешнего облучения разного типа на формирование ЛТР и не-ЛТР линий $CaII$ в спектрах атмосфер звезд $(A-M)$ -классов. Определение характера и главных механизмов не-ЛТР отклонений для населенностей уровней данного иона и профилей линий резонансного дублета $\lambda\lambda$ 3933,3968 Å и инфракрасного триплета $\lambda\lambda$ 8498, 8542, 8662 Å в облучаемых атмосферах.

5. Изучение возможности использования линий $CaII$ при анализе структуры ТДС разных типов в приближении ЛТР. Моделирование и сравнение с наблюдениями профилей и эквивалентных шириин линий $CaII$ в спектрах предкатаклизмических переменных *BE UMa*, *EG UMa*, *MS Peg*, *HR Cam*.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые выполнен детальный анализ статистического равновесия в атоме калия в $(A-K)$ -звездах для карликов и гигантов разной металличности.

2. Вычислены теоретические не-ЛТР поправки к содержанию калия для 5 спектральных линий KI в широком диапазоне звездных параметров: $T_{eff} = 4000 - 10000 K$, $\lg g = 0.0 - 4.5$, $[M/H] = (0.0) - (-2.0)$.

3. Впервые на основе однородного набора наблюдательных данных и параметров звезд, полученных соавторами, определены методом дифференциального анализа не-ЛТР содержания калия у 33 звезд диска Галактики.

4. Исследовано не-ЛТР формирование спектральных линий $CaII$ в атмосферах звезд с $T_{eff} = 4000, 6000$ и $10000 K$, $\lg g = 4.0$, $[M/H] = 0$, облучаемых внешним рентгеновским, жестким и мягким

ультрафиолетовым излучением.

5. С учетом внешнего облучения и отклонений от ЛТР рассчитаны профили линий $CaII$ в спектрах предкатаклизмических переменных *BE UMa*, *EG UMa*, *MS Peg* и *HR Cam*, а также кривые изменения их эквивалентных ширин с фазами орбитальных периодов.

Актуальность проблемы.

С начала 90-х годов произошел переход к использованию высокочувствительных цифровых приемников излучения (ПЗС-матриц), позволивший многократно повысить объем и качество получаемых наблюдательных данных. В связи с этим возросли требования к соответствующим теоретическим расчетам, для выполнения которых уже имеются надежные методы определения фундаментальных параметров звезд, обширные сетки моделей звездных атмосфер, качественные и однородные атомные данные для большого количества химических элементов. Однако, для получения высокоточных результатов необходимо учитывать также процессы, приводящие к отклонениям от термодинамического равновесия, роль которых для некоторых атомов особо велика. Таким образом актуальность наших исследований вызвана возросшим качеством наблюдений и необходимостью обеспечить максимальную точность их теоретического анализа.

Достоверность результатов, полученных в данной работе, подтверждается:

1. Выполненными тестовыми расчетами по проверке влияния атомных данных различных типов, моделей атмосфер звезд и методики моделирования.

2. Совпадением теоретических профилей с наблюдаемыми в Атласе Солица для максимальных наборов линий KI и $CaII$.

3. Найденной четкой зависимостью $[K/Fe]-[Fe/H]$ для 33 звезд диска Галактики, согласующейся с результатами опубликованных модельных расчетов химической эволюции Галактики

4. Согласием наблюдаемых и теоретических кривых изменения эквивалентных ширин линий $CaII$ с фазами орбитальных периодов тесных двойных систем *EG UMa*, *MS Peg*, *HR Cam*.

Научное значение имеют:

- вывод о существовании состояния сильной "сверхрекомбинации" для атомов KI в атмосферах всех звезд ($A-M$)-классов.
- вывод о применимости линий $CaII$ для анализа эффектов отражения и определения содержаний кальция и параметров тесных двойных систем с холодными белыми карликами ($15000 < T_{eff} < 35000K$) в рамках приближения ЛТР.

Методическое значение имеют:

- методики расчетов населенностей энергетических уровней KI и $CaII$, профилей и эквивалентных ширин их спектральных линий и содержания калия и кальция в атмосферах звезд в отсутствие ЛТР,
- методика вычисления населенностей уровней $CaII$ и профилей его линий в спектрах атмосфер звезд, облучаемых рентгеновским, жестким и мягким ультрафиолетовым потоком.

Практическое значение имеют:

- теоретические не-ЛТР поправки к содержанию калия для широких сеток моделей атмосфер,
- ЛТР и не-ЛТР содержания калия для выборки из 33 звезд диска Галактики,
- программы по расчету населенностей энергетических уровней KI и $CaII$, профилей и эквивалентных ширин их спектральных линий при отсутствии ЛТР в атмосферах звезд с внешним облучением и без него.

На защиту выносятся:

1. Разработанная на основе программного комплекса *NONLTE3* методика расчета не-ЛТР населенностей атомных уровней и профилей линий KI и $CaII$.
2. Рассчитанные для линий KI не-ЛТР поправки к содержанию в широком диапазоне звездных параметров ($T_{eff} = 4000 - 10000K$, $\lg g = 0.0 - 4.5$, $[M/H] = (0.0) \quad (-2.0)$). Вывод о формировании состояния сильной "сверхрекомбинации" в атоме KI в атмосферах всех звезд поздних спектральных классов и наличии отрицательных поправок к содержанию для наблюдаемых линий.
3. Полученные не-ЛТР поправки, ЛТР и не-ЛТР содержания

калия для 33 звезд диска Галактики.

4. Исследование формирования спектральных линий CaII в атмосферах звезд, облучаемых внешним рентгеновским, жестким и мягким ультрафиолетовым излучением. Вывод о формировании эмиссионных линий CaII только в спектрах звезд с ультрафиолетовым облучением. Доминирование в таком облучении мягкой компоненты приближает условия формирования линий к ЛТР.

5. Рассчитанные теоретические профили и эквивалентные ширины спектральных линий CaII в атмосферах тесных двойных систем *BE UMa*, *EG UMa*, *HR Cam*, *MS Peg*.

Аппробация работы. Основные результаты работы докладывались на 24 Международной школе молодых астрономов (Румыния, г. Бухарест, 1999 г.), на международной конференции JENAM-2000 (г. Москва, 2000 г.), на конференции "Физика космоса" (г. Екатеринбург, 2002 г.), на международной конференции "Interacting binary stars - 2003" (г. Одесса, 2003 г.), на Всероссийской конференции "БАК-2004" (г. Москва, 2004 г.), на итоговых научных конференциях КГУ и астрофизических семинарах кафедры астрономии КГУ.

СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы.

Во *введении* дается обоснование актуальности выбранной темы, формулируются ее цели и выносимые на защиту результаты, содержится список работ, в которых они опубликованы, а также краткая характеристика и структура данной диссертации.

В *первой главе* проведен обзор выполненных разными авторами не-ЛТР расчетов для щелочных и щелочно-земельных элементов в атмосферах одиночных звезд и облучаемых атмосферах тесных двойных систем. В конце главы обобщены основные достижения в области не-ЛТР исследований за последние годы и подтверждена актуальность данной работы.

Вторая глава состоит из двух параграфов и посвящена описанию используемых для расчета программ. В параграфе 2.1 приво-

дится изложение метода полной линеаризации и используемого для вычислений не-ЛТР населенностей энергетических уровней атомов программного комплекса *NONLTE3*. Отдельно указаны внесенные автором изменения в исходные подпрограммы комплекса. В параграфе 2.2 описан метод учета внешнего излучения на основе баланса функции нагрева и охлаждения среды и комплекс программ *SPECTR*, используемый для вычисления облучаемых моделей атмосфер, а также профилей и эквивалентных ширин линий в спектрах тесных двойных систем. Внесенные автором изменения в исходные подпрограммы данного комплекса рассмотрены в конце главы.

Третья глава состоит из четырех параграфов и посвящена описанию не-ЛТР расчетов для нейтрального калия. Параграф 3.1 включает описание модели атома KI , атомных постоянных и формул, используемых для вычисления процессов взаимодействия излучения и вещества. Параграф 3.2 посвящен анализу линий KI в спектре Солнца. Дано описание атомных данных, необходимых для расчета профилей спектральных линий, используемого наблюдательного материала, методики анализа линий. Далее изложен способ эмпирического уточнения атомных параметров и приведены индивидуальные не-ЛТР содержания калия для Солнца, определенные по профилям и эквивалентным ширинам пяти исследуемых спектральных линий для разных моделей атмосфер. Дано сравнение наблюдаемых и теоретических не-ЛТР профилей исследуемых спектральных линий KI . В параграфе 3.3 представлены результаты численных расчетов не-ЛТР эффектов в спектральных линиях KI в широком диапазоне звездных параметров ($T_{eff} = 4000 - 10000 K$, $\lg g = 0.0 - 4.5$, $[M/H] = (0.0) - (-2.0)$). Проанализированы причины отклонений от ЛТР в эквивалентных ширинах линий, подробно рассмотрены особенности формирования как сильных, так и слабых линий. Показаны конкретные зависимости теоретических не-ЛТР поправок к содержанию калия от T_{eff} при разных $\lg g$ и $[M/H]$ для пяти исследуемых линий KI . Сформулированы краткие выводы о величине и характере теоретических не-ЛТР поправок к содержанию калия. В параграфе 3.4 приведены результаты расчетов содержаний калия в звездах диска Галактики. Описан используе-

мый наблюдательный материал, методы и результаты определения параметров атмосфер исследуемых звезд. Представлены результаты определения содержаний калия с учетом не-ЛТР эффектов у 33 звезд диска Галактики. Проанализировано влияние отклонений от ЛТР на индивидуальные содержания калия в звездах и общую зависимость его содержаний от металличности.

Четвертая глава состоит из четырех параграфов и посвящена описанию не-ЛТР расчетов для иона $CaII$. В параграфе 4.1 описана модель атома $CaII$, включенные атомные постоянные и формулы, определяющие процессы перераспределения атомов по состояниям. Параграф 4.2 посвящен анализу линий $CaII$ в спектре Солнца. В нем перечислен набор атомных данных, необходимых для расчета профилей спектральных линий, исследуемого наблюдательного материала, методики анализа линий. Описан процесс эмпирического уточнения атомных параметров и приведены индивидуальные не-ЛТР содержания кальция для Солнца, определенные по профилям и эквивалентным ширинам 16 исследуемых спектральных линий для разных моделей атмосфер. Дано сравнение наблюдаемых и теоретических не-ЛТР профилей исследуемых спектральных линий $CaII$. В параграфе 4.3 приведены результаты исследования не-ЛТР отклонений в ионе $CaII$ в облучаемых атмосферах звезд. Рассмотрено три вида частотной зависимости внешнего излучения: рентгеновское, жесткое и мягкое ультрафиолетовое. Подробно изучены причины отклонений от ЛТР в ионе $CaII$ в облучаемых атмосферах и показаны результаты исследований влияния мощности внешнего излучения и угла его падения на отклонения от ЛТР. В параграфе 4.4 изучены условия формирования линий $CaII$ в спектрах предкатаклизмических переменных. Представлены результаты расчетов профилей и эквивалентных ширин линий $CaII$ в атмосферах тесных двойных систем $BE\ UMa$, $EG\ UMa$, $MS\ Peg$, $HR\ Cam$. Рассмотрены особенности формирования линий $CaII$ для каждого объекта.

В *заключении* кратко сформулированы основные результаты, полученные в работе.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1) Иванова Д.В., Шиманский В.В. Не-ЛТР анализ формирования линий KI в спектрах $A-K$ -звезд. // Астр. Ж., 2000, т. 77, с. 432-445.

2) Иванова Д.В., Сахибуллин Н.А., Шиманский В.В. Формирование линий $CaII$ в спектрах облучаемых атмосфер. Методика моделирования. // Астр. Ж., 2002, т. 79, с. 433-439.

3) Шиманский В.В., Бикмаев И.Ф., Галеев А.И., Шиманская Н.Н., Иванова Д.В., Сахибуллин Н.А., Мусаев Ф.А., Галазутдинов Г.А. Наблюдательные ограничения на синтез калия при формировании звезд галактического диска. // Астр. Ж., 2003, т. 80, с. 816-829.

4) Иванова Д.В., Сахибуллин Н.А., Шиманский В.В. Исследование формирования линий $CaII$ в спектрах облучаемых атмосфер. // Астр. Ж., 2004, т. 81, с. 523-540.

5) Ivanova D.V., Shimansky V.V., Sakhibullin N.A. The influence of the non-LTE effects for $CaII$ lines on the spectra of CBS. // JENAM-2000, Moscow, 29 May – 3 June 2000, Abstract Book, p. 77.

6) Иванова Д.В., Шиманский В.В., Сахибуллин Н.А. Не-ЛТР анализ спектральных линий $CaII$ в облучаемых атмосферах звезд. // Физика Космоса. Труды 31-й международной студенческой научной конференции 28 января – 1 февраля 2002 г., с. 164.

7) Шиманская Н.Н., Бикмаев И.Ф., Галеев А.И., Шиманский В.В., Иванова Д.В., Сахибуллин Н.А., Мусаев Ф.А., Галазутдинов Г.А. Не-ЛТР анализ содержаний калия в звездах Галактического диска. // ВАК-2004 "Горизонты Вселенной". Труды Всероссийской астрономической конференции 3 – 10 июня 2004 г., Москва, МГУ, ГАИШ, с. 137.

8) Иванова Д.В., Шиманский В.В., Сахибуллин Н.А. Не-ЛТР анализ формирования спектральных линий KI и $CaII$. // ВАК-2004 "Горизонты Вселенной". Труды Всероссийской астрономической конференции 3 – 10 июня 2004 г., Москва, МГУ, ГАИШ, с. 153.

Вклад автора в совместные работы состоит в следующем.

В работах 1, 2, 4, 5, 6, 8 участие автора состоит в постановке задачи, разработке методик, анализе результатов и написании текста статей, выполнении всего объема расчетов. В работах 3, 7 участие автора состоит в выполнении не-ЛТР расчетов и участии в анализе

результатов.

Donah

№ 17262

РНБ Русский фонд

2006-4

14971